Die Küste, 34 (1979), 132-139

Über den Einfluß von Tidezyklen und Sturmfluten auf die Temperaturerhöhungen in Tideflüssen infolge der Einleitung von Abwärme

Von Horst Schwarze und Wilfried Falldorf

Zusammenfassung

In einem hydraulisch-thermischen Modell wurde der Einfluß von Tidezyklen mit Nipp- und Springtiden und von Sturmflutereignissen auf die Temperaturerhöhung infolge der Einleitung von Abwärme in ein Ästuar untersucht. Die Ergebnisse der Modellversuche haben gezeigt, daß bei naturähnlichen Tideverhältnissen, wie z. B. in der Elbe, sowohl bei Tidezyklen als auch bei Sturmfluten keine größeren Temperaturerhöhungen im Fernfeld auftraten als bei mittleren Tiden.

Summary

A thermal hydraulic model was used to investigate the influence of tidal cycles with neap and spring tides and of storm surge events on the distribution of temperature increases caused by heat injection in an estuary. The results of the model test showed that under natural tidal conditions such as those in the River Elbe no higher temperature increases occurred during tidal cycles, nor in the far field region during storm surges, than those which occurred under mean tidal conditions.

Inhalt

1. Einführung 132
2. Einflußparameter 133
3. Untersuchungen in einem hydraulisch-thermischen Tidemodell 133
3.1 Hydraulisch-thermisches Modell 133
3.2 Versuche mit einem Tidezyklus 134
3.2.1 Hydrologische Verhältnisse 134
3.2.2 Versuchsergebnisse 135
3.3 Versuche mit Sturmfluten 136
3.3.1 Hydrologische Verhältnisse 136
3.3.2 Versuchsergebnisse 138
4. Zusammenfassung 139

1. Einführung

Untersuchungen über Temperaturerhöhungen in Tideflüssen im Fernfeld infolge der Einleitung von Abwärme werden in hydraulischen Modellen wie auch in mathematischen Modellen im allgemeinen mit mittleren Tiden durchgeführt. Die in der Natur vorherrschenden hydrologischen Verhältnisse sind dabei nur ungenau wiedergegeben. Der Einfluß eines Tidezyklus mit Nipp- und Springtiden oder von Sturmflutereignissen auf die Ausbreitung der eingeleiteten Abwärme sowie auf die entsprechende Temperaturerhöhung in einem Tidefluß kann möglicherweise für die Beurteilung einer geplanten Kühlwasser-Einleitung von Bedeu-

Die Küste, 34 (1979), 132-139

tung sein. Im Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover wurden deshalb hydraulisch-thermische Modellversuche durchgeführt, um die Abhängigkeit der Temperaturerhöhungen von natürlichen, von der mittleren Tide abweichenden Tideverhältnissen zu ermitteln.

2. Einflußparameter

Temperaturerhöhungen im Fernfeld eines Tideflusses sind im allgemeinen von der Ausbreitung und Vermischung des eingeleiteten aufgewärmten Kühlwassers im Tidefluß selbst und vom Wärmeaustausch zwischen der Wasseroberfläche und der Atmosphäre abhängig. Die Ausbreitung und Verteilung des eingeleiteten Kühlwassers im Tidefluß ist von folgenden Faktoren abhängig:

1) von der Anfangsvermischung im Nahfeld mit vertikaler und horizontaler Ausbreitung,
2) von der mehrmaligen Belastung eines Wasserkörpers mit Abwärme als Folge der Tidebewegung und
3) vom Abtransport der Wärme aus dem Einflußbereich der Kühlwassereinleitung durch den Oberwasserabfluß sowie in der Brackwasserzone eines Tideflusses durch den Austausch von Süß- und Salzwasser (Dichteströmung).

Entsprechend der Differenz der Ebbe- und Flutwege aufeinanderfolgender Tiden wird ein „Warmwasserpaket" mehr oder weniger oft die Kühlwasser-Einleitungsstelle passieren und sich dabei sägeartig stromabwärts bewegen, bis es nach einigen Tiden die Einleitungsstelle mit dem Flutstrom nicht mehr erreicht. Die Flut- und Ebbewege sind einerseits vom Oberwasserabfluß des Tideflusses und andererseits von den verschiedenen Flut- und Ebbetidewassermengen, die durch die halbtägliche und halbmonatliche Ungleichheit der Tide bzw. durch den Windstau bei Sturmflut verursacht werden, abhängig.

In jeder Tide eines natürlichen Tidezykluses treten, anders als bei einer Folge gleicher mittlerer Tiden, entsprechend den unterschiedlichen Tidedauern und den verschieden großen Tidestiegen und Tidefällen jeweils auch andere Strömungs- und Durchflußverteilungen auf. Die Kenterzeiten der Ebbe- oder Flutströmung haben besonderen Einfluß auf die horizontale Ausbreitung des eingeleiteten aufgewärmten Kühlwassers.

3. Untersuchungen in einem hydraulisch-thermischen Tidemodell

3.1 Hydraulisch-thermisches Modell

In einem hydraulisch-thermischen Tidemodell der Elbe wurden im Franzius-Institut die Einflüsse von Tidezyklen und Sturmfluten, die bei den meisten der bisher durchgeführten hydraulisch-thermischen Untersuchungen nicht berücksichtigt wurden, auf die Temperaturerhöhung im Fernfeld infolge von Abwärme-Einleitungen ermittelt. In diesem Modell wurde ein Bereich der Unterelbe von Grauerort (Elbe-km 660) bis Altenbruch (Elbe-km 720) mit einem Längenmaßstab von 1 : 300 und einem Tiefenmaßstab von 1 : 100 nachgebildet. Abb. 1 zeigt einen Teilbereich des Modells von rd. 30 km Länge mit den Kühlwasser-Einleitungsstellen A und B mit $Q_{K(A)}$ = rd. 92 m³/s und $Q_{K(B)}$ = rd. 60 m³/s bei einer Aufwärmspanne von $\triangle T_K$ = 10K, entsprechend einem Wärmeeintrag von 4000 MJ/s und 2500 MJ/s.

Die Küste, 34 (1979), 132-139

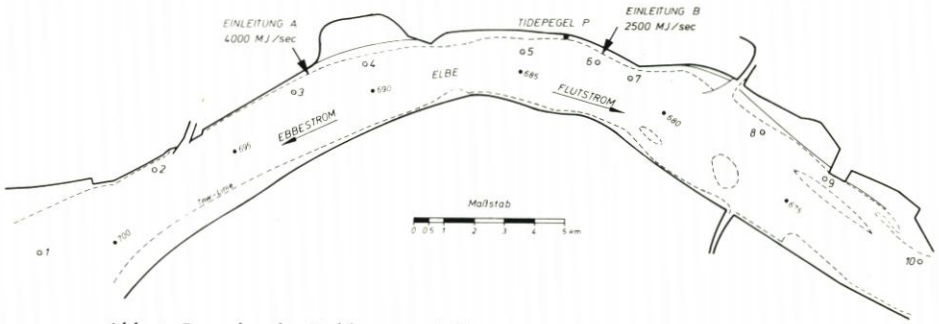

Abb. 1. Lageplan der Kühlwasser-Einleitungen und der Temperaturmeßstellen

Die Temperaturmeßstellen 1 bis 10 stellen lediglich einen Teil der insgesamt rd. 100 Temperaturmeßstellen dar, an denen die Wassertemperaturen mit Temperatur-Sensoren in jeweils drei Wassertiefen gemessen wurden. Bei dieser Meßmethode war eine dreidimensionale Beschreibung der tideabhängigen Temperaturerhöhung im Fernfeld möglich. Alle in den folgenden Abbildungen dargestellten Tidekurven wurden am Tidepegel P (Abb. 1) gemessen.

Die Steuerung des Tidemodells sowie die Meßdatenerfassung und -auswertung erfolgte durch ein Rechnersystem.

Vor Beginn der Modelluntersuchungen mit Tidezyklen und Sturmfluten wurden mehr als zwanzig mittlere Tiden als Vorlauftiden in das Modell eingesteuert. Diese Anzahl von Vorlauftiden ist bei mittleren Tideverhältnissen und mittlerem Oberwasserabfluß erforderlich, damit ein bei Kenterung des Ebbestromes mit aufgewärmtem Kühlwasser belasteter Wasserkörper so weit stromab transportiert worden ist, daß er mit dem Flutstrom die Einleitungsstelle nicht mehr erreicht.

3.2 Versuche mit einem Tidezyklus

3.2.1 Hydrologische Verhältnisse

Abb. 2 zeigt den Unterschied zwischen Springtiden und Nipptiden im Modellbereich der Elbe. Der mittlere Springtidehub beträgt rd. 295 cm und der mittlere Nipptidehub rd. 235 cm.

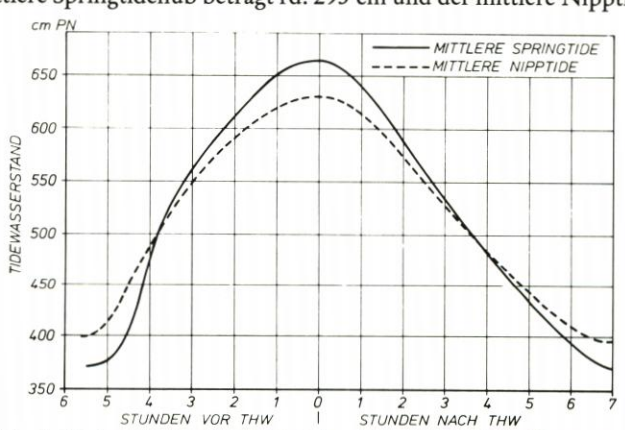

Abb. 2. Mittlere Springtide und mittlere Nipptide im Elbe-Ästuar am Pegel P

Die Küste, 34 (1979), 132-139

Als Modelltide wurde ein typischer Tidezyklus von 18 Tagen ausgewählt, der in Abb. 3 dargestellt ist.

Die Tiden während der Nippzeit weisen einen rd. 16 % geringeren Tidehub auf als der mittlere Tidehub während des ausgewählten 18-Tage-Zeitraumes. Die Springtidehübe sind bis zu 14 % größer als der mittlere Tidehub.

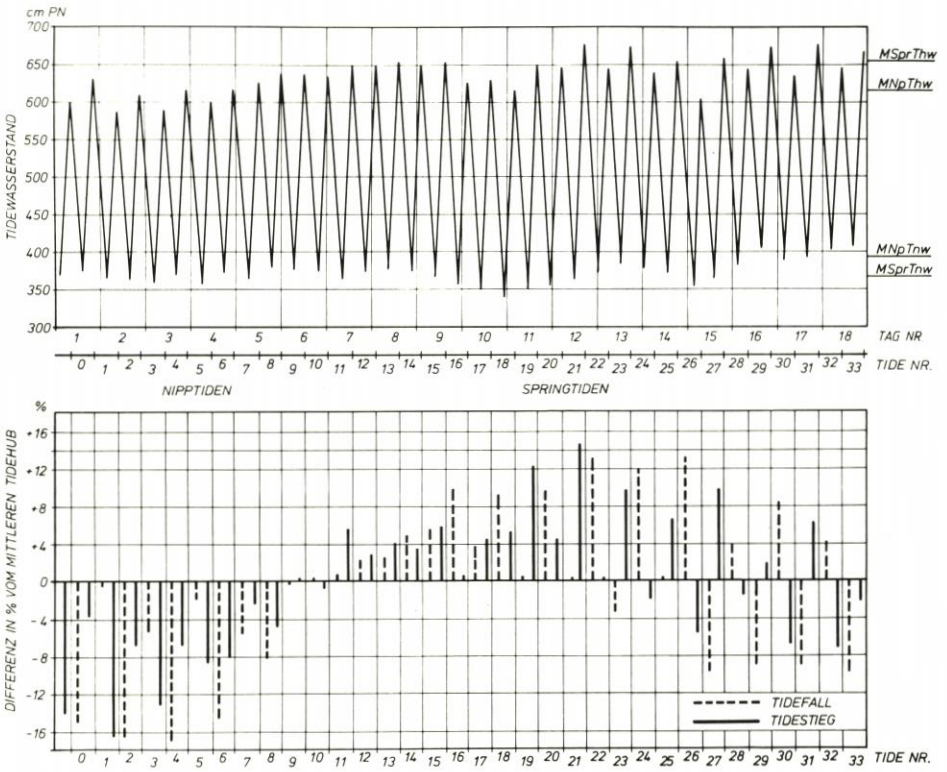

Abb. 3. Charakteristischer Tidezyklus von 18 Tagen im Elbe-Ästuar am Pegel P

3.2.2 Versuchsergebnisse

Ausgewählte Ergebnisse der Modellversuche sind in Abb. 4 als Ganglinien der Temperaturerhöhung während einer Nipptide (Tide Nr. 6) und während einer Springtide (Tide Nr. 22) für die Meßstellen 2 (unterstrom der Einleitungen), 3 (nahe der Einleitung A), 5 (nahe der Einleitung B) und 8 (oberhalb der Einleitungsstellen) dargestellt.

Die Abbildungen zeigen, daß die Differenzen zwischen den Temperaturerhöhungen trotz der verschiedenen Tidehübe von Nipp- und Springtide nur rd. 0,1 K betrugen. Die über eine Tidedauer gemittelten Temperaturerhöhungen waren für Nipp- und Springtiden nahezu gleich.

Diese Meßergebnisse sind dadurch zu begründen, daß die Temperaturerhöhungen im Fernbereich hauptsächlich von der während der Vortiden eingeleiteten Wärme abhängig sind und auf die unterschiedlichen Tideverhältnisse im Verlauf eines Tidezyklus nur unwesentlich reagieren.

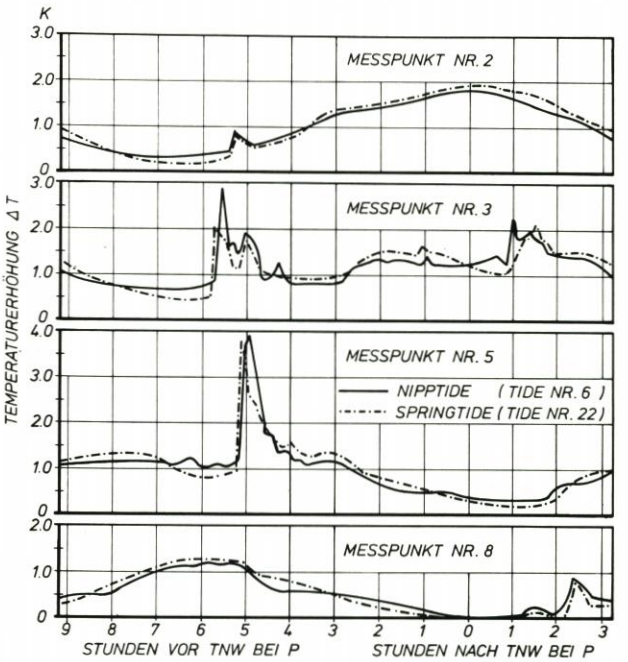

Abb. 4. Temperaturerhöhung bei einer Nipptide und einer Springtide

3.3 Versuche mit Sturmfluten

3.3.1 Hydrologische Verhältnisse

Diese Untersuchungen wurden mit zwei grundsätzlich verschiedenen Sturmfluten durchgeführt. Abb. 5 zeigt die Modellsturmfluten I und II. Beide Sturmfluten hatten zwar annähernd gleiche höchste Wasserstände (HThw), jedoch unterschiedliches Windstauverhal-

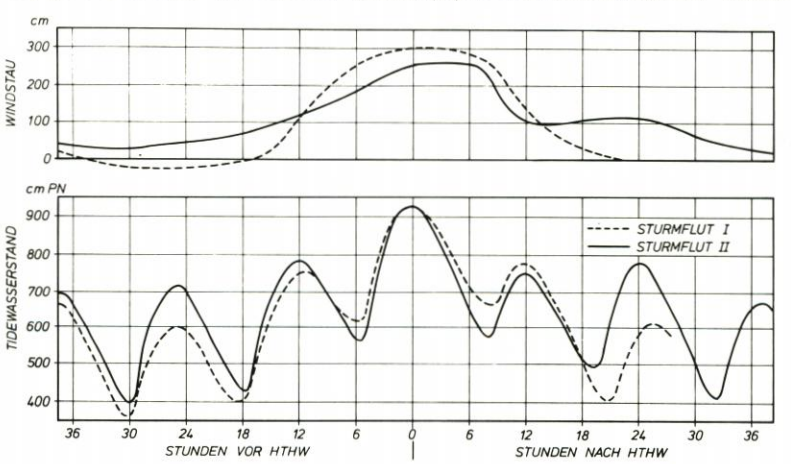

Abb. 5. Gegenüberstellung der beiden verschiedenen untersuchten Sturmfluten

Die Küste, 34 (1979), 132-139

ten. Der Windstau ist definiert als Wasserstandsdifferenz zwischen der vorausberechneten astronomischen Tide und der in der Natur aufgetretenen Sturmflut.

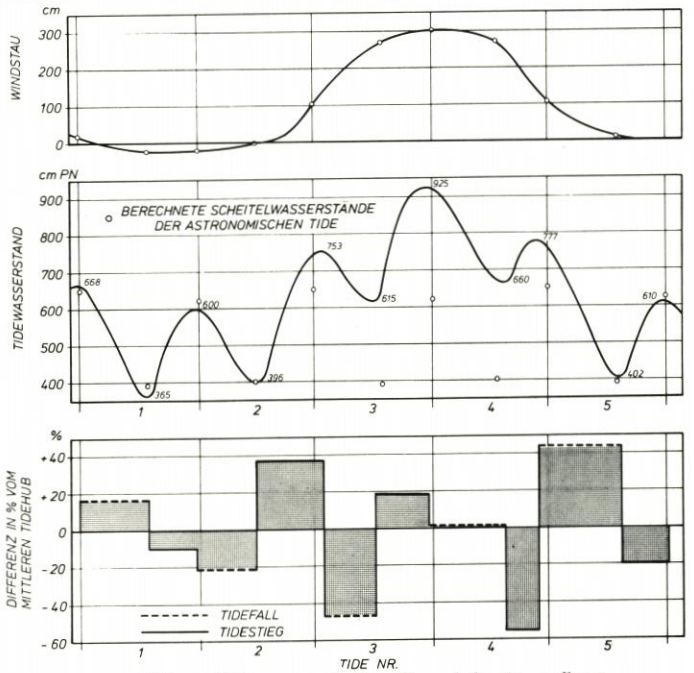

Abb. 6. Tidewasserstände während der Sturmflut I

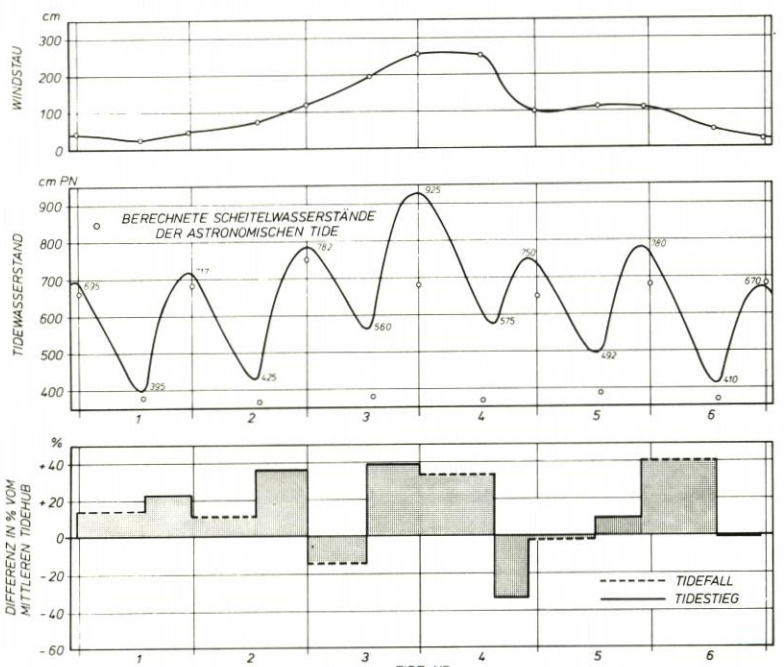

Abb. 7. Tidewasserstände während der Sturmflut II

Während Sturmflut I steigt der Windstau nach der ersten Tide in rd. 1 ½ Tiden von 0 auf 3 m an, fällt dann in rd. 1 Tide wieder auf 0 ab. Bei Sturmflut II dagegen wird das Maximum des Windstaus mit 2,80 m erst nach rd. 3 Tiden erreicht. Danach nimmt der Windstau in 1 ½ Tiden auf 1 m ab und bleibt über rd. 1 ½ Tiden konstant.

In Abb. 6 und 7 ist die Abweichung der Tidefälle und -stiege bei den Sturmfluten I und II von denen bei mittleren Tiden dargestellt. Die Differenzen betragen teilweise mehr als 50 % bei Sturmflut I und bis zu 40 % bei Sturmflut II.

3.3.2 Versuchsergebnisse

Abb. 8 zeigt die über eine Tidedauer gemittelten Temperaturerhöhungen jeweils für die erste, zweite und dritte Tide vor dem HThw als Längsschnitt über die Meßstellen 1 bis 10 (s. Abb. 1) in dem von der eingeleiteten Abwärme beeinflußten Flußabschnitt.

Die mittleren Temperaturerhöhungen stiegen sowohl bei Sturmflut I als auch bei Sturmflut II wegen der vorherrschenden Strömungen in Flutstromrichtung von Tide zu Tide bis zum HThw oberhalb der Wärmeeinleitungsstellen an und nahmen unterhalb ab.

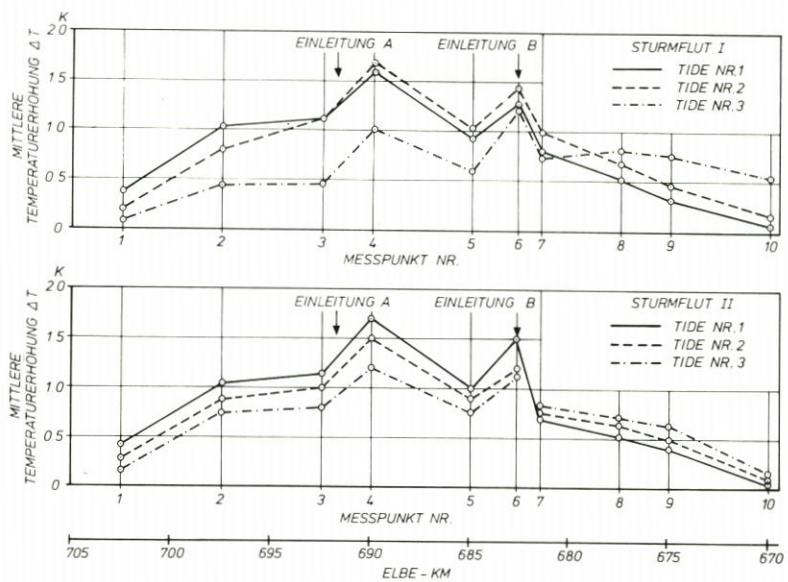

Abb. 8. Mittlere Temperaturerhöhungen während der Sturmfluten

Dabei verursachte der schnelle Anstieg des Windstaus bei Sturmflut I einen größeren Temperaturabfall unterhalb bzw. einen größeren Temperaturanstieg oberhalb der Einleitungsstellen als der langsamere Anstieg des Windstaus bei Sturmflut II, der über eine längere Zeit anhielt. Die während der Sturmfluten nach oberstrom transportierte Abwärme bewirkte beim Ablaufen der Sturmflut keine größeren Temperaturerhöhungen im Tidefluß als beim Auflaufen. Die maximalen, bei mittleren Tideverhältnissen ermittelten Temperaturerhöhungen wurden bei den untersuchten Sturmflutereignissen nicht überschritten, was vor allem darauf zurückzuführen ist, daß ein größeres Wasservolumen für die Vermischung des eingeleiteten Kühlwassers verfügbar ist.

Die Küste, 34 (1979), 132-139

4. Zusammenfassung

In einem hydraulisch-thermischen Tidemodell der Elbe wurden im Franzius-Institut die Einflüsse von Tidezyklen und Sturmfluten auf die Temperaturerhöhung im Fernfeld durch die Einleitung von aufgewärmtem Kühlwasser untersucht.

Bei den gewählten hydrologischen Randbedingungen, die natürlichen Tideverhältnissen in der Elbe entsprachen, wurden während der Tidezyklen und Sturmfluten keine größeren maximalen Temperaturerhöhungen gemessen als während mittlerer Tiden. Demnach sind zur Beurteilung der Wärmebelastung von Tideflüssen bei entsprechenden bzw. ähnlichen Tideverhältnissen hydraulisch-thermische Untersuchungen mit mittleren Tiden als repräsentativ anzusehen.

Bei anderen Tideverhältnissen, wie z. B.

- bei Tiden mit wesentlich größerer halbtäglicher oder halbmonatlicher Ungleichheit,
- bei wesentlich ungünstigeren Verhältnissen des Oberwasserabflusses zur Tidewassermenge (d. h. eine geringere Anzahl von Passagen eines Wasserkörpers) oder der eingeleiteten Kühlwassermenge zur Tidewassermenge oder
- bei einer relativ höheren Belastung eines Tideflusses mit Abwärme

sind Untersuchungen allein mit mittleren Tiden für die Beurteilung der thermischen Belastung von Tideflüssen nicht ausreichend.

Sturmfluten bewirken in den stromab der Einleitungsstelle gelegenen Bereichen des Tideflusses keine größeren Temperaturerhöhungen als mittlere Tiden, da für die Vermischung des eingeleiteten erwärmten Kühlwassers eine größere Wassermenge zur Verfügung steht.

Darüber hinaus muß jedoch beachtet werden, daß eine gewisse Verschiebung des mit Abwärme beaufschlagten Gebietes nach oberstrom stattfindet. Allerdings wurden hier keine größeren Temperaturerhöhungen festgestellt als in dem Gebiet, das durch die Einleitung der Abwärme bei mittleren Tiden beeinflußt wurde.

Weitere Grundsatzuntersuchungen über den Einfluß von unterschiedlichen Tideverhältnissen auf die Temperaturerhöhung in Tideflüssen durch die Einleitung von aufgewärmtem Kühlwasser sind geplant.